

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники физического факультета
Казанского государственного университета

На правах рукописи

ЛЫОНГ Вьет Лок

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВАРИАЦИЙ
МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫХ ЧАСТОТ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Специальности: 01.04.03 – Радиофизика
25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ – 2006

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук,
профессор Насыров Альберт Махмутович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Дёминов Марат Гарунович

доктор физико-математических наук,
доцент Шерстюков Олег Николаевич

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита состоится «29» июня 2006 г. в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном уни-
верситете им. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлев-
ская, 18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «___» мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18
доктор физико-математических наук

А.В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Известно, что ионосфера Земли подвержена влиянию космической погоды. Поскольку ионосфера является средой распространения радиоволн для различных радиотехнических систем, то изменения этой погоды влияют на надежность их работы. Особо важное значение это имеет для систем дальней декаметровой радиосвязи. Одним из важных параметров, определяющих возможности коротковолновой радиосвязи через ионосферу, является максимально наблюдаемая частота (МНЧ). Характеристики ионосферы, в частности электронная плотность, изменяются под влиянием многих факторов космической погоды: интенсивности солнечной лучевой радиации, геомагнитной активности Солнца, напряженности магнитного поля Земли, изменений гравитационных сил Луны, волновых процессов и т.д., которые имеют случайные характеристики. Поэтому для распространяющихся в ионосфере радиоволн среда является неустойчивым каналом, характеристики которого зависят как от времени, так и координат в пространстве.

В настоящее время особый интерес в вопросах переноса энергии в верхней атмосфере представляет мало изученные волновые процессы, возбуждаемые различными геофизическими возмущениями. Одним из их проявлений в ионосфере являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Поэтому изучение волновых вариаций электронной концентрации на различных высотах актуально для развития геофизики и решения ряда практических задач освоения околоземного космического пространства.

Для исследования проявлений геофизических эффектов на уровнях ионосферы разработано и реализовано много методов, использующих спутники, ракеты, ионозонды и т.д. Среди них важное место занимают наземные радиофизические методы дистанционного зондирования ионосферы. Получение новых геофизических знаний связано с дальнейшим развитием этих методов на основе создания новых высокочувствительных методик измерений, и на передний план выходит проблема создания оптимальных (по помехоустойчивости и времени измерений) методик. Такая возможность предоставляется с использованием для зондирования ионосферы сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и оптимальных методов их обработки в приемнике. Устройства, использующие такой подход и названные ЛЧМ ионозондами, позволяют с высокой достоверностью в масштабе времени зондирования определять при наклонном зондировании радиолинии МНЧ, которая является индикатором состояния ионизированной компоненты газа в области отражения зондирующей волны. При этом информация о перемещающихся ионосферных

возмущениях будет содержаться в суточных ходах МНЧ. Существующие теории физики ионосферы и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что электронная концентрация содержит как регулярную, так и случайную компоненты. Поэтому и суточные ходы МНЧ должны содержать регулярную и остаточную компоненты. Поскольку волновые процессы формируют тонкую структуру ионосферы, то логично предположить, что данные о перемещающихся ионосферных возмущениях будут содержаться в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ. В этой связи очевидна существующая проблема разделения суточных ходов МНЧ на составляющие, выделения в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ информации о характеристиках перемещающихся ионосферных возмущений, а также научного обоснования методик интерпретации результатов этих измерений. Это позволит решить задачу исследования связи перемещающихся ионосферных возмущений с геофизическими возмущениями.

Цель диссертационной работы состоит в создании радиофизической методики измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений на основе экспериментальных данных о суточных ходах МНЧ, полученных с помощью ЛЧМ ионозонда, научного обоснования методики интерпретации результатов измерений и исследовании связи процессов с геофизическими возмущениями ионосферы, а также их влияния на наклонное распространение декаметровых радиоволн.

Задачами данной работы являются:

1. Создание методики измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений, на основе анализа распространения в ионосфере сверхширокополосных ЛЧМ сигналов, создания алгоритма автоматического определения МНЧ радиолинии, разделения суточных ходов МНЧ на регулярную и остаточную компоненты и выделения эффектов перемещающихся ионосферных возмущений.
2. Разработка вычислительного эксперимента математического моделирования влияния состояния ионосферы и перемещающихся ионосферных возмущений на суточные ходы МНЧ. Создание методики интерпретации результатов анализа остаточной компоненты суточных ходов МНЧ.
3. Анализ результатов теоретических исследований влияния вариаций солнечной активности и перемещающихся ионосферных возмущений на характеристики остаточной компоненты суточных ходов МНЧ.
4. Разработка методики проведения натурных экспериментов с использованием ЛЧМ ионозонда. Развитие методики мониторинга ионосферы в области, расположенной в средней точке дальней радиолинии, путем

комбинации метода математического моделирования состояния ионосферы и метода ее ЛЧМ зондирования.

5. Проведение натурных экспериментов по исследованию влияния перемещающихся ионосферных возмущений на наклонное распространение декаметровых радиоволн, а также по исследованию обобщенных характеристик остаточной компоненты суточных ходов МНЧ для дальних радиолиний широтного и меридионального направлений. Нахождение вероятностных характеристик остаточной компоненты суточных ходов МНЧ (математическое ожидание, стандартное отклонение, закон распределения и корреляционные характеристики).

6. Доказательство гипотезы существования регулярных и остаточных компонент в суточных ходах МНЧ в соответствии с полученными теоретическими и экспериментальными результатами. Интерпретация данных натурных экспериментов на основе совместного анализа результатов теоретического и экспериментального методов разделения суточных ходов МНЧ на регулярную и остаточную компоненты. Получение характеристик перемещающихся ионосферных возмущений.

Методы исследования. Решение поставленных теоретических задач базируется на применении хорошо изученного метода геометрической оптики. Численное моделирование проведено с использованием международной модели ионосферы (IRI). В работе применялись методы математического моделирования и математической статистики. Натурные исследования проведены с применением метода наклонного зондирования ионосферы с использованием ЛЧМ ионозондов, которыми оснащена сеть радиолиний в Западной Европе и Сибири, протяженностью от 2,6 до 5,7 Мм. Для обработки экспериментальных данных использовались спектральные методы, статистические методы анализа данных и методы распознавания образов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы определяются использованием адекватного математического аппарата, статистически достаточным набором экспериментальных данных, полученных за период с 1990г. по 2005г., хорошим согласием экспериментальных данных с результатами математического моделирования, повторяемостью результатов, а также проверкой на соответствие выводам других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика комплексного исследования характеристик суточных ходов МНЧ на основе метода математического моделирования ионосферы и метода ее наклонного зондирования с помощью ЛЧМ ионозонда.

2. Результаты исследования влияния геомагнитной и солнечной активностей на характеристики остаточной компоненты суточных ходов МНЧ.

3. Методика измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений, на основе анализа распространения в ионосфере широкополосных ЛЧМ сигналов, алгоритма автоматического определения МНЧ радиолинии, и алгоритма разделения суточных ходов МНЧ на регулярную и остаточную компоненты и выделения эффектов перемещающихся ионосферных возмущений.

4. Экспериментальные характеристики остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и их корреляционные связи с амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений.

5. Характеристики обнаруженных в спектральной области «восходно-заходных» эффектов в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ.

Научная новизна работы

1. Разработана новая методика интерпретации данных наклонного зондирования ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда, позволяющая в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ радиолинии выделять эффекты влияния перемещающихся ионосферных возмущений.

2. Разработана новая методика измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений по экспериментальным данным об остаточной компоненте суточных ходов МНЧ.

3. Впервые выделены связи между характеристиками остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и амплитудами перемещающихся ионосферных возмущений; представлены результаты натурных исследований связей между характеристиками остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолиний большой протяженности и уровнем геомагнитной активности; обнаружены временные «восходно-заходные» эффекты в спектральной области остаточной компоненты суточных ходов МНЧ.

4. Предположен новый подход в исследовании одновременного влияния на дальнейшее распространение декаметровых радиоволн перемещающихся ионосферных возмущений на основе анализа остаточной компоненты суточных ходов МНЧ.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Результаты исследования характеристик остаточной компоненты суточных ходов МНЧ в зависимости от геомагнитной, солнечной активностей и времени суток могут быть использованы в методе краткосрочного прогнозирования условий распространения декаметровых радиоволн.

2. Результаты исследования характеристик вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ могут быть использованы для улучшения алгоритма радиомониторинга декаметровых радиоканалов.

3. Результаты исследования корреляции между вариацией остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и амплитудами перемещающихся ионосферных возмущений, уровнями геомагнитной и солнечной активностей могут служить предметом для дальнейшего развития теории физических процессов на уровнях верхней атмосферы.

Личный творческий вклад автора. Работа носит преимущественно экспериментальный характер. Натурные экспериментальные работы по наклонному зондированию ионосферы, включенные в диссертацию, выполнены в кооперации с учеными МарГТУ. Автор принимал непосредственное участие в обработке и анализе данных, а также их интерпретации. Автор принимал непосредственное участие в проведении вычислительных экспериментов для моделирования ионограмм на сети радиолиний, протяженностью от 2,6 до 5,7 Мм, на территории Западной Европы и Сибири. Автором разработан алгоритм для дискретной модели наклонного распространения, основанной на теоремах эквивалентности. Автором разработаны методика разделения суточных ходов МНЧ на регулярную и остаточную компоненты, методика выделения периодических составляющих в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ, проведен анализ вариаций остаточной компоненты суточных ходов МНЧ в зависимости от геомагнитной и солнечной активности, а также от времени суток, сезона и года. Автором сформулированы научные выводы и положения, которые выносятся на защиту.

Апробация работы и публикация. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены в научно-техническом журнале «Георесурсы» (2006); на X, XII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь - RLNC» (Воронеж, 2004; Воронеж, 2006); на XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Йошкар-Ола, 2005); на XVIII международной конференции «Прикладной электромагнетизм и коммуникация - IEEE ICESOM 2005» (Хорватия, Дубровник, 2005); на XI конференции северо-западного региона России "Распространение радиоволн" (С. Петер-

бург, 2005); на III международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005); на 60-й научной сессии НТО РЭС им. А.С. Попова (Москва, 2005); на VII международной конференции молодых ученых БШФФ «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2004); а также на научных конференциях Казанского государственного университета и Марийского государственного технического университета.

По материалам диссертации опубликовано 13 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Она содержит 178 страниц основного текста, 65 иллюстраций, 21 таблиц, список цитируемой литературы из 116 наименований и 1 приложение.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований, приведены краткая характеристика и содержание работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается критический анализ современного состояния исследований ионосферных возмущений в рамках решения проблемы исследования космической погоды, а также возможностей метода наклонного зондирования (НЗ) с применением сверхширокополосного ЛЧМ сигнала в рамках проблемы развития радиофизических методов дистанционного зондирования ближнего космоса. Рассмотрены основные факторы, влияющие на вариации суточных ходов МНЧ. Главным из них является пространственно-временная изменчивость среды распространения сигналов – ионосферной плазмы. Показано, что изменчивость и неоднородность ионосферы обусловлена различными процессами. Один из них связан с прохождением внутренних гравитационных волн, вызывающих эффект перемещающихся ионосферных возмущений. Последние, наряду с другими эффектами, приводят к вариациям МНЧ радиолиний. Рассмотрены основные параметры и характеристики перемещающихся ионосферных возмущений. Высказана гипотеза о существовании регулярной и остаточной компонент суточных ходов МНЧ, позволяющая на ее основе разработать методику разделения этих компонент и методику определения параметров перемещающихся ионосферных возмущений.

Показано, что в настоящее время наибольшее распространение в мировой практике диагностики ионосферы получили ионозонды со сверхширокополосным ЛЧМ сигналом, обладающим сверхбольшой базой. В

настоящее время слабо изучено влияние слабых перемещающихся ионосферных возмущений на ионограммы НЗ и практически не развиты методики измерения характеристик таких возмущений при ЛЧМ зондировании ионосферы. Для решения этой задачи требуется проведение научного обоснования предлагаемых методик измерений с привлечением методов математического моделирования. Это также необходимо для интерпретации экспериментальных суточных ходов МНЧ, подверженных случайным вариациям, вызванным изменениями космической погоды, в частности - солнечной и магнитной возмущенности.

Информация об использованной в экспериментах диссертационного исследования сети наклонного зондирования ионосферы, покрывающей радиолниями Западную Европу и Сибирь, приведена в *табл. 1*.

Таблица 1

Передачик - приемник	Протяженность, км
Хабаровск – Йошкар-Ола	5700
Магадан – Йошкар-Ола	5400
Сан-Торкас (Испания) – Йошкар-Ола	4000
Иркутск – Йошкар-Ола	3500
Инскип (Англия) - Йошкар-Ола	3100
Шпицберген – Йошкар-Ола	2800
Кипр – Йошкар-Ола	2600

Вторая глава посвящена научному обоснованию методики интерпретации экспериментальных данных НЗ ионосферы ЛЧМ сигналами на основе математического моделирования влияния геомагнитной активности и перемещающихся ионосферных возмущений на суточные ходы МНЧ. Для этого задавалась модель профиля электронной концентрации ионосферы в виде двух составляющих и модель перемещающихся ионосферных возмущений и рассчитывались МНЧ заданных радиолний.

Модель профиля электронной концентрации, учитывающая как регулярную, так и нерегулярную составляющие, задавалась в виде:

$$N_e(h) = N_p(h) \cdot (1 + N_n(h)), \quad (1)$$

где $N_p(h)$ - регулярная составляющая профиля,

$N_n(h) = \frac{\Delta N}{N} \exp\left(-(h - h_c)^2 / z_m^2\right) \cdot \sin(2\pi h / l)$ - его нерегулярная составляющая,

$\delta N = \Delta N / N$ - вариация электронной концентрации, h_c - высота стратификации перемещающихся ионосферных возмущений, z_m - диапазон стра-

тификации, l - вертикальный масштаб перемещающихся ионосферных возмущений.

Параметры ионосферы получены из международной статистической модели IRI, позволяющей рассчитывать профиль электронной концентрации для любой точки на Земле при заданных: сезоне, времени суток, активности Солнца и геомагнитной активности.

Для расчета МНЧ радиолнии решалось волновое уравнение в приближении геометрической оптики для сферически симметричной ионосферы. Использовались теоремы эквивалентности, когда за основу брались результаты расчетов характеристик вертикального зондирования, которые затем по полученным формулам, положенным в основу алгоритма расчета МНЧ, пересчитывались на наклонное распространение:

$$f_n = f_e \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{2R_s \sin \frac{D}{2R_s}}{c\tau_e + 2R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s}\right)} \right)^2}{1}}, \quad (2)$$

и

$$\tau_n = \left\{ \tau_e + \frac{2R_s}{c} \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s}\right) \right\} \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{2R_s \sin \frac{D}{2R_s}}{c\tau_e + 2R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s}\right)} \right)^2}{1}}. \quad (3)$$

где f_e - критическая частота вертикального распространения, τ_e - задержка вертикального распространения, D - протяженность трассы, f_n - МНЧ эквивалентного наклонного распространения, τ_n - задержка эквивалентного наклонного распространения, $\theta \approx D / 2R_s$ и

$$\tau(f) = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{2}{c} \int_0^{h_r} \frac{d}{d\omega} (\omega \cdot n(h, \omega)) dh = \frac{2}{c} \int_0^{h_r} \frac{dh}{n(h, f)}.$$

Вычислительные эксперименты по исследованию вариаций МНЧ радиолний были проведены для сети радиолний, представленных в табл. 1. Расчеты охватывали разные сезоны одного периода активности Солнца (11 лет) с 1994 по 2005 годы. Исследовался главный (односкачковой) мод распространения декаметровых радиоволн в ионосфере (мод 1F).

Предполагалось, что суточные ходы МНЧ заданы последовательностью, содержащей как регулярную, так и остаточную компоненты:

$$u(t) = u_r(t) + \tilde{u}(t) \quad (4)$$

где $u_r(t)$ - регулярная компонента суточных ходов МНЧ; $\tilde{u}(t)$ - остаточная компонента суточных ходов МНЧ.

Суточные ходы МНЧ разделялись методом фильтрации низких частот, с частотой среза 8-10 F_{ϕ} , на регулярную и остаточную компоненты. Остаточная компонента анализировалась по критериям случайности процесса. В работе показано, что при фильтрации суточных ходов МНЧ низкочастотным фильтром с частотой среза 8-10 F_{ϕ} , остаточную компоненту на периоде суток можно считать случайным процессом. Для исследования зависимости вариаций остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от времени суток использовался метод скользящего временного окна с перекрытием 50% ($\delta T_w = 0.5$) и апертурой, равной 3 часам ($T_w = 3ч.$). Исследовалась зависимость вариаций остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от времени суток. В качестве характеристик использовались *математическое ожидание* (μ) и *стандартное отклонение* (σ).

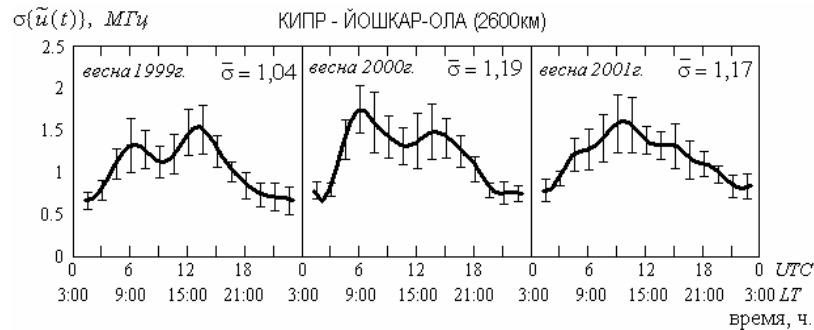


Рис. 1 - Суточные вариации стандартного отклонения остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолинии Кипр – Йошкар-Ола для весеннего времени

Результаты исследования характеристик стандартного отклонения остаточной компоненты суточных ходов МНЧ ($\sigma\{\tilde{u}(t)\}$) для весеннего времени, полученные для радиолинии Кипр – Йошкар-Ола (2600 км) представлены на рис. 1. Аналогичные зависимости имеют место и для других радиолиний. Их анализ позволяет сделать следующие обобщающие заключения:

- весной, осенью и зимой суточные вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ выше днем, чем ночью.
- летом разница между вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ в течении суток менее выражена;

- вариация остаточной компоненты суточных ходов МНЧ достигает максимума в периоды около полудня, восхода и захода Солнца. Минимум вариации имеет место в моменты времени 22:00-4:00 LT, т.е. сразу после захода и до восхода Солнца.

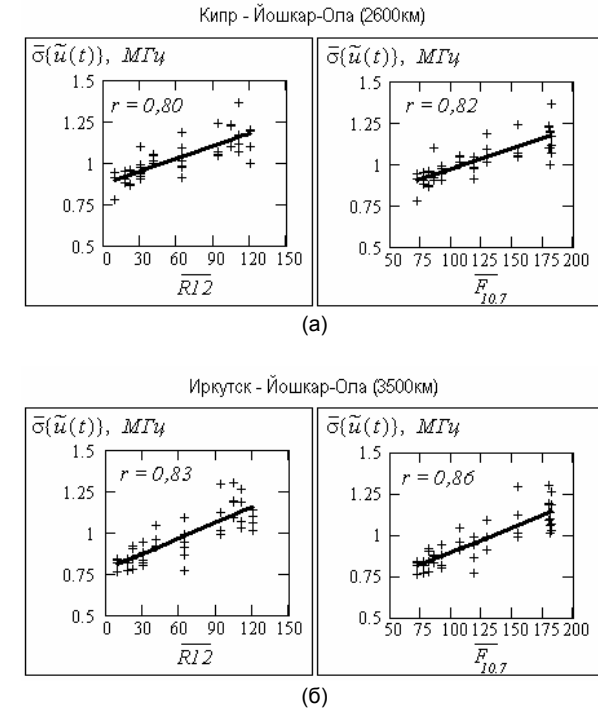


Рис. 2 – Зависимость суточных вариаций остаточной компоненты МНЧ радиолиний Кипр – Йошкар-Ола (а) и Иркутск – Йошкар-Ола (б) от уровня солнечной активности за период с 1994 по 2005г.

Результаты моделирования суточных ходов МНЧ за период 1994-2005г обнаруживают почти линейные зависимости $\bar{\sigma}\{\tilde{u}(t)\}$ от среднего числа солнечных пятен ($\overline{R12}$), среднего значения солнечной радиации ($\overline{F_{10.7}}$). Для радиолиний Кипр – Йошкар-Ола и Иркутск – Йошкар-Ола такие зависимости показаны на рис. 2 (а) и (б). Аналитически их можно представить следующими формулами:

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_R) = 2,55 \cdot 10^{-3} \mu_R + 0,87, \quad (0 \leq \mu_R \leq 150) \quad (5)$$

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_F) = 2,45 \cdot 10^{-3} \mu_F + 0,73, \quad (50 \leq \mu_F \leq 200) \quad (6)$$

для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_R) = 3,15 \cdot 10^{-3} \mu_R + 0,78, \quad (0 \leq \mu_R \leq 150) \quad (7)$$

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_F) = 3,04 \cdot 10^{-3} \mu_F + 0,59, \quad (50 \leq \mu_F \leq 200) \quad (8)$$

где $\sigma_{\varepsilon} = \overline{\sigma\{\tilde{u}(t)\}}$, $\mu_R = \overline{R12}$, и $\mu_F = \overline{F_{10.7}}$.

Исследовалась связь между вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и характеристиками перемещающихся ионосферных возмущений. Результаты исследований, проведенных для всех радиолиний в разное время суток, указывают на линейную возрастающую зависимость вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от амплитуды перемещающихся ионосферных возмущений. Кроме этого, вариация остаточной компоненты суточных ходов МНЧ из-за перемещающихся ионосферных возмущений днем (7:00-19:00 LT) выше, чем ночью (19:00-07:00 LT). Это объясняется более высокой дневной электронной концентрацией в ионосферном F-слое.

На рис. 3 показаны функциональные зависимости вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений для радиолинии Кипр – Йошкар-Ола в летнее время. Результаты исследования показывают, что вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ, вызванные влиянием перемещающихся ионосферных возмущений выше в полуденное время (10:00-14:00 LT) и ниже ночью. Такая зависимость от времени суток проявляется в большей степени в периоды высокой солнечной активности (1999-2003г.).

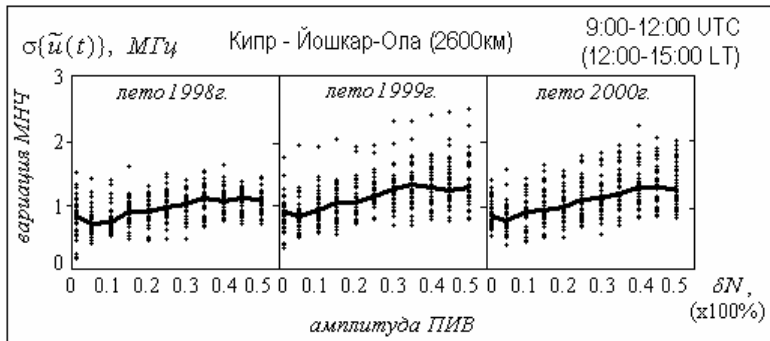


Рис. 3 - Связь между амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений и летними вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолинии Кипр – Йошкар-Ола

Математический анализ позволил установить связь между вариацией остаточной компоненты суточных ходов МНЧ ($\sigma\{\tilde{u}(t)\}$) и амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений (δN) в форме полинома четвертой степени:

$$\sigma\{\tilde{u}(t)\} = F(\delta N) = \sum_{n=0}^4 a_n (\delta N)^n, \quad (0,01 \leq \delta N \leq 0,5) \quad (9)$$

Таким образом, полученные теоретические результаты представляют основу методики интерпретации результатов наклонного зондирования радиолиний большой протяженности и позволяют сформулировать методику измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений по данным об остаточной компоненте суточных ходов МНЧ, определенным из результатов НЗ радиолиний с помощью ЛЧМ ионозонда.

В третьей главе представлено обоснование оптимальной методики измерения остаточной компоненты суточных ходов МНЧ при использовании для зондирования ионосферы сверхширокополосного ЛЧМ сигнала: теоретические аспекты работы ЛЧМ ионозонда, методика формирования ионограмм НЗ и методика выделения остаточной компоненты в суточных ходах МНЧ.

Сверхширокополосный зондирующий ЛЧМ сигнал с полосой 2-30 МГц распространяется на радиолинии по M различным лучам и поступает на вход приемника вместе с комплексом помех: флуктуационных и сосредоточенных, преобладающих в дециметровом диапазоне. В приемнике он сжимается в частотной области. В результате на его выходе имеем последовательность спектров сигнала разностной частоты, отнесенных к разным рабочим частотам из диапазона зондирования, заданным на сетке с шагом 100 кГц. В работе показано, что произвольный k -ый амплитудный спектр сигнала разностной частоты можно представить в виде:

$$|S_k(F)| = |S_k(\tau)| = T_{\tau} \sum_{i=1}^M H_{oi}(f_k) \cdot \left| \frac{\sin[\pi \Delta f_{\tau}(\tau - \tau_i)]}{\pi \Delta f_{\tau}(\tau - \tau_i)} \right|, \quad (10)$$

где f_k - текущее значение зондирующей частоты, соответствующей данному спектру, τ_i - время группового запаздывания на данной частоте, $\Delta f_{\tau} = T_{\tau} \dot{f}$, T_{τ} - длительность элемента сигнала разностной частоты, Δf_{τ} - соответствующая ему полоса частот.

Показано, что сжатие сигнала в частотной области приводит к тому, что спектральная плотность мощности сигнала на выходе согласованного приемника возрастает в $B_{\tau} = \Delta f_{\tau} T_{\tau}$ раз по сравнению с плотностью на

входе. Это приводит к росту отношения сигнал/шум примерно в 10^5 раз. Поэтому методика измерения, реализованная с использованием сверхширокополосного зондирующего сигнала, обладает повышенной помехоустойчивостью.

Спектр разностного сигнала, полученный с помощью метода БПФ, представляет собой последовательность отсчетов, а ионограмма - матрицу. Элементами матрицы могут являться смесь сигнала и шума, либо только шум. Поэтому в разработанной методике автоматического измерения МНЧ была решена задача обнуления элементов, содержащих только сигналы шума. При этом использовались пороговые методы и методы пространственной фильтрации изображений.

Для выделения остаточной компоненты в суточных ходах МНЧ использовались методы фильтрации. При этом остаточная компонента относилась к высокочастотной составляющей. Дано обоснование такого разделения суточных ходов и методики выделения периодических составляющих в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ в частотной области.

Описана экспериментальная установка Марийского государственного технического университета, основу которой составляет ЛЧМ ионозонд, имеющий следующие характеристики: диапазон рабочих частот 1,6-30 МГц; скорость изменения частоты 100 кГц/с; диапазон наблюдаемых задержек сигнала 5 мс; излучаемая мощность 100 Вт. Описаны техника натурного эксперимента по исследованию возмущений МНЧ на основе ЛЧМ ионозонда МарГТУ, условия проведения эксперимента и указан объем экспериментальных данных.

В четвертой главе представлены результаты натурного исследования средне и коротко периодических вариаций МНЧ. В ней приведены результаты исследования обобщенных характеристик остаточной компоненты суточных ходов МНЧ для радиолиний широтного и меридионального направлений, представленных в *табл. 1*. Представлена интерпретация результатов натурного эксперимента путем сопоставления их с данными проведенных в работе теоретических исследований. С использованием критериев Стьюдента, Дарбина-Уотсона, Пирсона доказан случайный характер остаточной компоненты натуральных суточных ходов МНЧ для радиолиний с протяженностью 2,6-5,7 Мм.

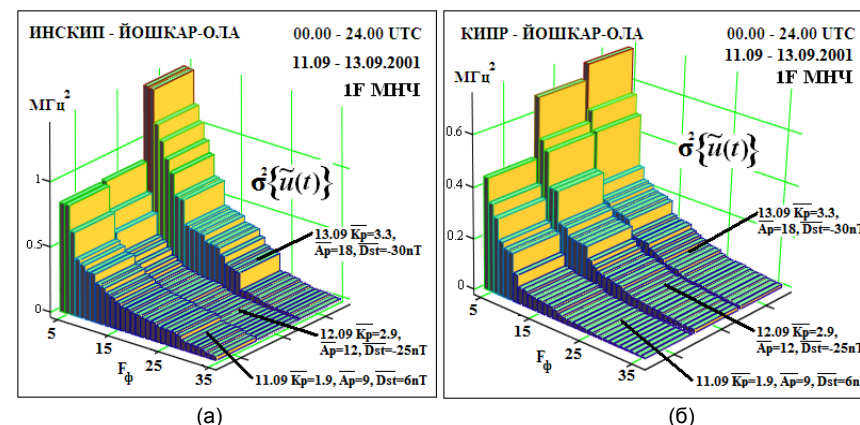


Рис. 4 – Мощность остаточной компоненты суточных ходов МНЧ мода 1F трассы Инский – Йошкар-Ола (а) и Кипр – Йошкар – Ола (б)

Обнаружена корреляция мощности остаточной компоненты суточных ходов МНЧ разных модов распространения радиоволн в ионосфере с уровнем геомагнитной активности, иллюстрацией которой является *рис. 4*. На нем показана зависимость мощности (дисперсии – $\sigma^2\{\tilde{u}(t)\}$) остаточной компоненты суточных ходов МНЧ мода 1F от уровня геомагнитной активности. Видно, что в области частот $5 \div 28 F_\phi$ с ростом возмущенности увеличивается мощность остаточной компоненты. Результаты анализа показали, что для спокойных дней полоса частот остаточной компоненты, имеющей связь с уровнем геомагнитной активности, превышает $40 F_\phi$, а для возмущенных дней меньше $40 F_\phi$. В частотных областях $10 \div 16 F_\phi$ и $22 \div 28 F_\phi$ были выделены периодические составляющие остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудами $\sim 0.2 \div 1$ МГц, которые согласно полученным результатам теоретических исследований обусловлены перемещающимися ионосферными возмущениями с периодами $\sim 1-3$ часа. Исследование вариаций текущего спектра остаточной компоненты суточных ходов МНЧ позволили выделить «восходно-заходные» эффекты, которые выражаются в значительных изменениях спектральных амплитуд и расширении полосы в область высоких частот в периоды восхода (4:00 – 8:00 LT) и захода (16:00 – 20:00 LT) Солнца по местному времени (LT).

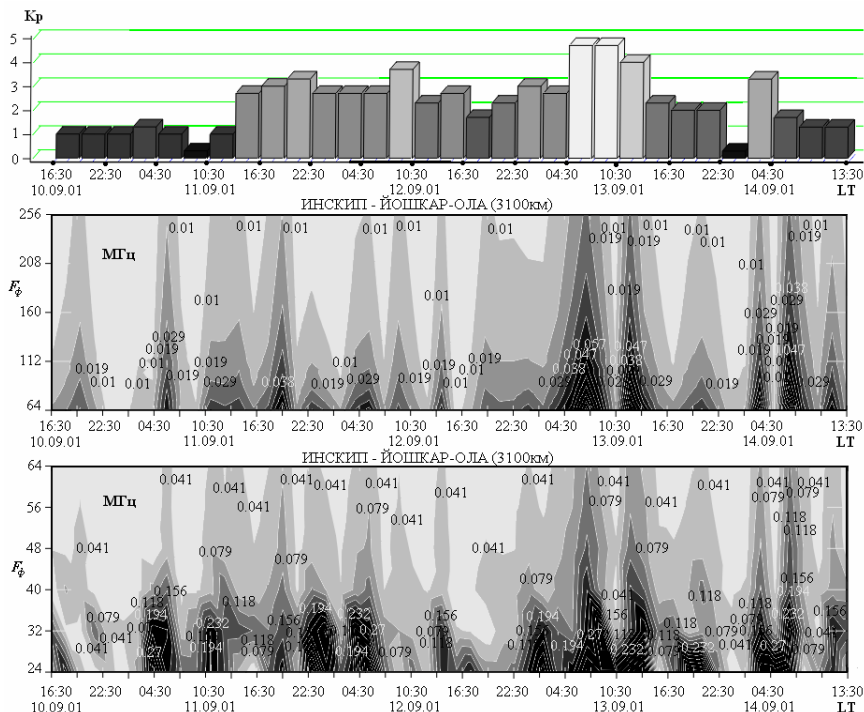


Рис. 5 – Спектры остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолиния Инскип – Йошкар-Ола, полученные в период с 10.09.2001 по 14.09.2001

На рис. 5 представлены спектры остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолиния Инскип – Йошкар-Ола в периоды разной геомагнитной активности. Видно, что с увеличением геомагнитной возмущенности амплитуда синусоидальных составляющих растет, а занимаемый ими диапазон расширяется в область высоких частот. Это означает, что в области терминатора возбуждаются перемещающиеся ионосферные возмущения, амплитуда и частотный диапазон которых увеличиваются с ростом геомагнитной активности. Оценены амплитуды перемещающихся ионосферных возмущений для восходного и заходного времени.

Итак, результаты проведенных комплексных исследований свидетельствуют о том, что остаточной компоненты суточных ходов МНЧ является чувствительным индикатором состояния космической погоды на уровнях верхней атмосферы Земли. В этой связи в работе предположен подход в исследовании одновременного влияния на дальней распространение декаметровых радиоволн перемещающихся ионосферных возмущений

, а также методика мониторинга ионосферы в областях отражения сверхширокополосных зондирующих ЛЧМ сигналов на дальних декаметровых радиолиниях.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработаны новые методики: интерпретации данных наклонного зондирования ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда, позволяющая в остаточной компоненте суточных ходов МНЧ радиолинии выделять эффекты влияния перемещающихся ионосферных возмущений; измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений по экспериментальным данным об остаточной компоненте суточных ходов МНЧ.

2. Получены экспериментальные и математические функциональные зависимости между характеристиками остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и основными параметрами перемещающихся ионосферных возмущений. Установлена их связь с уровнем солнечной активности и оценены параметры перемещающихся ионосферных возмущений.

3. Получены зависимости мощности остаточной компоненты суточных ходов МНЧ двух модов $1F$ и $2F$ от уровня геомагнитной активности и определены полосы частот, для которых остаточная компонента в большей степени связана с уровнем геомагнитной активности.

4. Обнаружены «восходно-заходные» эффекты в уровне и частотном диапазоне остаточной компоненты суточных ходов МНЧ на среднеширотных радиолиниях и высокоширотной радиолинии и определена их связь с уровнем геомагнитной активности.

5. На основе анализа остаточной компоненты суточных ходов МНЧ предположен подход в исследовании одновременного влияния на дальней распространение декаметровых радиоволн перемещающихся ионосферных возмущений, а также методика мониторинга ионосферы в областях отражения сверхширокополосного зондирующего ЛЧМ сигнала.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Льонг Вьет Лок*. Линейное прогнозирование максимально применимых частот по данным ЛЧМ ионозонда / *В.А Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // Научно-техническая конференция МарГТУ в 2003 г. : Сб. статей. - Йошкар-Ола, 2004. – С. 144-155.
2. *Льонг Вьет Лок*. Фильтрация случайной компоненты суточных вариаций максимально наблюдаемых частот дальних ионосферных радиолиний / *В.А Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Радиолокация,

навигация, связь - RLNC»: Сб. статей X-й международной научно-технической конференции. - Воронеж, 04.2004. - Т. 2. - С. 1129-1139.

3. *Льонг Вьет Лок*. Анализ остаточной компоненты временного ряда максимально наблюдаемых частот магистральных радиолиний / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Актуальные проблемы науки в 21 веке»: Сб. докладов молодежной научно-практической конференции, посвященной 200-летию Казанского государственного университета. - Зеленодольск, 2004. - С. 36-37.

4. *Льонг Вьет Лок*. Исследование регулярной и случайной составляющих суточного хода максимально наблюдаемых частот среднеширотных радиолиний протяженностью 2-6 Мм / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: Сб. докладов VII-й конференции молодых ученых. - Иркутск, 09.2004. - С. 132-134.

5. *Льонг Вьет Лок*. Корреляция мощности остаточной компоненты суточного хода максимально наблюдаемых частот с уровнем геомагнитной активности / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // Конференция молодых ученых, посвященная 200-летию Казанского государственного университета: Сб. докладов. - Казань, 11.2004. - С. 127.

6. *Льонг Вьет Лок*. Влияние геомагнитной активности на остаточную компоненту суточных вариаций максимально наблюдаемых частот / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров и др.* // Секция «Распространение радиоволн и дифракция»: Сб. докладов. 60-й научной сессии НТО РЭС им. А.С. Попова. - Москва, 05.2005. - Т. 2. - С. 141-142.

7. *Льонг Вьет Лок*. Связь между характеристиками остаточной компоненты суточного хода максимально наблюдаемых частот и уровнем геомагнитной активности / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XXI-й Всероссийской научной конференции. - Йошкар-Ола, 05.2005. - Т. 1. - С. 231-235.

8. *Льонг Вьет Лок*. Восходный и заходный эффекты в остаточной компоненте суточного хода максимально-наблюдаемых частот / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XXI-й Всероссийской научной конференции. - Йошкар-Ола, 05.2005. - Т. 1. - С. 226-230.

9. *Льонг Вьет Лок*. Характеристики остаточной компоненты суточного хода максимально-наблюдаемых частот дальних ионосферных радиолиний / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Фундаментальные проблемы физики»: Сб. докладов III-й международной конференции. - Казань, 06.2005. - С. 176.

10. *Luong Viet Loc*. Investigating long-range ionospheric radiolines by analyzing maximum observed frequencies daily variances / *V.A. Ivanov, Luong Viet Loc, A.M. Nasyrov, N.V. Ryabova* // In the proceeding papers of the 18th IEEE international conference on applied electromagnetics and communications (ICE-Com 2005). - Dubrovnik, Croatia, 10.2005. - P. 79-82.

11. *Льонг Вьет Лок*. Моделирование ионограмм для исследования влияния ионосферных стратификаций на суточные ходы МНЧ / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XI-й конференции северо-западного региона России. - С. Петербург, 12.2005. - С. 35-37.

12. *Льонг Вьет Лок*. Моделирование влияния ионосферных возмущений на дальнейшее распространение декаметровых радиоволн / *В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // «Радиолокация, навигация, связь - RLNC»: Сб. статей XII-й международной научно-технической конференции. - Воронеж, 04.2006. - Т. 1. - С. 591-603.

13. *Льонг Вьет Лок*. Моделирование ионограмм для исследования перемещающихся ионосферных возмущений и их влияния на суточные ходы максимально наблюдаемых частот / *В.А. Иванов, Льонг Вьет Лок, А.М. Насыров, Н.В. Рябова* // Научно-технический журнал «Георесурсы». - 2006. - № 2 (19) 2006. - С. 24-26.